

太陽光発電システムの需要構造と普及政策の効果

著者	荒川 潔
雑誌名	大妻女子大学紀要. 社会情報系, 社会情報学研究
巻	27
ページ	1-11
発行年	2018-12-30
URL	http://id.nii.ac.jp/1114/00006654/

太陽光発電システムの需要構造と普及政策の効果

荒川 潔*

要 約

近年、政府の補助金政策の効果もあり、太陽光発電システムが世界的に急速に普及している。太陽光発電システムへの投資には大きな不確実性を伴うため、固定価格買取制度などの固定的な金銭的インセンティブとともに、リースなどの不確実性を低下させる取引形態の普及促進が図られている。また、太陽光発電システムの効率的な普及を目的として、導入時の発電設備容量に応じた補助金や発電量に応じた補助金が交付されている。そして、太陽光発電システムの導入におけるピア効果のため、その普及においてコミュニティーの役割が重要視されている。本稿では、太陽光発電システムの需要構造を分析した先行研究を概観することで、効率的な普及を実現するための要因を把握するとともに、普及政策の効果を検討する。

1. はじめに

太陽光発電はバイオマスや風力、地熱、水力などの再生可能エネルギーの中でも近年急速に普及し、この10年間で年間平均で47%も増大している(REN21, 2016)。太陽光発電システムの生産規模の拡大とR&Dによる技術革新はめざましく、システム価格が下がることで競争力を増している(Jäger-Waldau, 2006; Parida *et al.*, 2011; Razykov *et al.*, 2011)。しかしながら、原子力発電や石炭火力発電などと比較すると依然として発電コストが高い。そのような状況下、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの効果的な普及を図るため、政府の役割の重要性が増している。

多くの国々ではこれまで太陽光発電の導入に対して多額の補助金を交付しているものの、補助金

の費用対効果や社会厚生観点での評価は定かではない。太陽光発電の普及や技術革新は補助金の影響を強く受けるため、一般的な純粋な市場主導の普及とは異なる(Jaffe *et al.*, 2002; Rosendahl, 2004; Davies and Diaz-Rainey, 2011)。補助金政策は、太陽光発電システムのサイズに応じて導入時に補助される発電設備容量ベースの補助金と、発電した電力量に応じて支払われる発電量ベースの補助金に大別できる。どちらの補助金が再生可能エネルギーの導入を促進させるのかについては、多くの研究がなされているものの、明確な結論は得られていない(Couture and Gagnon, 2010; Ragwitz, *et al.*, 2007; Butler and Neuho, 2008)。

発電量に応じた補助金を交付する制度に固定価格買取制度(Feed-in tariff, FIT)がある。発電者の余剰電力に対してプレミアムを付与した買取価

*大妻女子大学 社会情報学部

格を支払うこの制度では、発電者である消費者は電力を供給することで利益を得ることができる。さらには、設置に関わる補助金やリベート、ローンなどを組み合わせると、太陽光発電システム普及の大きな原動力となる。この状況は、住宅用の屋根に設置する太陽光発電システムが政策上優遇されている日本やドイツ、イタリアなどの国でよく見られる。

米国では、余剰電力の買取制度としてネットメータリングを用いている州が多い。この自己消費の余剰分を電力市場に売る制度では、発電者は順潮流と逆潮流の双方向に対応し両方向に回転する電力メーターで電力を売買し、買電と売電は物理的な量である kWh で計測される。さらには発電者である消費者には、設置の補助金や減税などの優遇措置が与えられることになる。

このような余剰電力の買取制度は太陽光発電の普及に大きな影響を与えているが、近年、それらの制度の見直しが進められている。米国では、電力会社の固定費回収が困難になるデススパイラル問題により、ネットメータリング制度の変更や廃止の検討を行っている州がある。そして日本やドイツでは、賦課金の増大にともなう国民負担の増大により、FIT の電力買取価格が引き下げられている。

以上を踏まえると、現状は、太陽光発電の普及に関して、環境問題を社会的な費用負担の問題よりも優先して考えた段階から、社会的な費用負担の適正化のため、太陽光発電の効率的な普及を図る段階に入ったと考えることができる。したがって、持続的な太陽光発電システムの開発との普及のためには、太陽光発電の需要構造を詳細に理解し、それに応じた補助政策の立案が不可欠となる。そのため本稿では、先行研究を概観することで太陽光発電の需要構造の理解を深め、これまでの普及政策の効果を検討し、今後の課題を明らかにする。

本研究の構成は以下の通りである。次節では太陽光発電の出力変動の特徴を明らかにする。第3節では太陽光発電に伴う不確実性について分析する。第4節では太陽光発電に関する補助金政策の

効果を検討する。第5節ではFITの効果を説明する。第6節では太陽光発電の導入におけるピア効果や太陽光発電の導入と立地の関係を明らかにする。第7節では結論を述べる。

2. 太陽光発電の出力変動

再生可能エネルギーの発電は自然状況に強く影響を受け、需給調整能力がない発電パターンとなる。特に太陽光発電は大きな出力変動を伴うため、太陽光発電システムを電力系統に接続するのは容易ではない。太陽光発電のパフォーマンスに影響を与える要因は、システムの設計や組織と関係がある内生的要因と、環境などと関係がある外生的要因に分類できる。内生的要因には、モジュールのタイプや発電設備容量、設置形態、インバーターの設置、設置の向きなどがある (Chang, 2009; Huld *et al.*, 2010; Eke and Senturk, 2012)。外生的要因には、日射量や気温、風速、埃、積雪などがある (Dong and Wiser, 2013)。多くの先行研究において屋上設置の太陽光発電の検証が行われ、導入の形態によって太陽光発電システムの導入の費用に顕著な違いが見られることが明らかとなっている (Gillingham *et al.*, 2016)。

日中のサイクルや季節性を超えた予測不可能な発電や需要の変動が生じると、計画されていない停電のリスクを高める。再生可能エネルギーの導入が増大すると、自然状況に影響される短期的なリスクと発電システムの分散化に伴う長期的な調整という新しい問題が生じる。そのため、太陽光発電を効果的に活用するには、出力変動を的確に予測する必要がある。

太陽光発電システムの場合、日中と夜間の発電の断絶は避けられない。しかしながら、日中の発電の変動性については、日射量は正午に最大となり、それは徐々に変化するため、ある程度予測できる。そのため、1時間までの短い時間であればかなりの精度で予測ができる。しかしながら、空間的な詳細化や数日間の予測の信頼性の向上に比べると、気象や日射量の予測の精度は低いものとどまっている。

太陽光発電システムは、風による雲や埃によっても影響を受け、モジュールの効率性も大きく影響を受ける。そのため、雲の変動が大きい状況では、太陽光発電システムは電力系統への突然の電力供給によるランピングを生じさせることになる。十分に大きな発電所の場合、モジュールが一斉に変動することはないが、Wang and Sueyoshi (2017) は、カリフォルニア州での大規模な太陽光発電システムの導入の効果を検証し、80～90%の導入において非効率性があることを明らかにしている。この太陽光発電システムのインパクトは、太陽光発電システムを敷地内で分散させることで、ある程度緩和することができる。

このようなサイクル的な間欠性や変動性は、周波数や電圧の安定性をリスクにさらすことになる。この不確実性に対応し、さらには電力系統に接続する太陽光発電システムの発電設備容量を増大させるためには、バックアップ電源の利用や出力抑制などの採用が必要となる。電力系統での発電量が不足する場合、バックアップ電源の設置だけでは大規模な出力変動に対応できない。そのため電力系統において変動性の高い電源が増大すると、通常の発電所の柔軟な運用が必要となる。しかしながら、全ての火力発電所はすぐには反応できないため、バックアップ容量の慎重な計画が求められる。電力供給が過剰となる場合、パネルの運用を停止するという出力抑制が行われる。しかしながら、出力抑制の運用は簡単ではあるものの、発電設備の所有者に被害をもたらすため、基本的には避けるべき手段である。

3. 不確実性

太陽光発電の導入にはリターンが不確実な中で多額の投資を行う必要がある (Shih and Chou, 2011)。キャッシュリベートなどの政策は、太陽光発電の導入に対して固定的な金銭的インセンティブを与える。それらは太陽光発電パネルの発電設備容量に応じて支払われ、太陽光発電導入の費用に対して確実性を与える。多くの場合、家計は固定的な金銭的インセンティブと発電に応じた

インセンティブの組み合わせに応じた対価を得ることになる。

不確実性は、購入するかリースするのかといった導入形態の選択においても重要な役割を果たす。Drury *et al.* (2012) は、カリフォルニア州で増加傾向にあるリース取引を分析し、オーバーナイトコストなどの導入時の金銭的な負担を低下させることを明らかにした。つまり、新しい技術を導入する際のいくつかの複雑さや不確実性を取り除き、導入することによる金銭的な便益を単純な月額として再構築できるのである。Rai and Sigrin (2013) は、厳しいキャッシュフローの消費者がリースを好むため、リースは現金に貧しい市場セグメントに効果的であることを明らかにした。

Bauner and Crago (2015) は、不確実性に対応して投資を遅らせる便益を考慮するオプション価値フレームワークを用いて、家計の太陽光発電に対する投資行動を分析した。そして、リベートや金融的インセンティブは導入までの時間を短縮するが、それらの効果は家計が太陽光発電投資にオプションバリュー決定ルールを適用すると低下することを明らかにした。さらに、導入段階でインセンティブを与える政策が、太陽光発電の投資におけるリターンの不確実性を最も効果的に低下させることを明らかにした。

政府や自治体の政策によるサポートにより、太陽光発電システムの導入の費用が低下し、需要が拡大している (Barbose *et al.*, 2013; Fischlein and Smith, 2013)。しかしながら、太陽光発電システムのような資本集約的な耐久財においては、システム費用以外の太陽光発電システムの導入に関する情報探査など非金銭的な費用が強く影響する (Jager, 2006)。さらに、急速な技術進歩と費用の低下が期待される技術においては、リアルオプション問題が顕著である。このような問題を分析するには、資本集約的なエネルギー技術の導入に関係する家計の意思決定のプロセスを理解する必要がある。太陽光発電の導入を検討する際、幅広い情報ソースから情報を入手し、導入に関する不確実性を低下させるのが一般的である。住宅用太陽光発電システムの導入においては、ピア効果

(Graziano and Gillingham, 2015)、ビジネスモデル (Blackburn *et al.*, 2014)、電力価格 (Darghouth *et al.*, 2011)、割引率 (Davidson, 2015) などの要因が不確実性をもたらすことが明らかにされている。

4. 補助金

太陽光発電システムは政府の政策と金銭的な補助により、再生可能エネルギーの中では最も急速に普及している (Badcock and Lenzen, 2011)。消費者は異なる価格構造に対して異なる反応を示すため、太陽光発電の導入は税やインセンティブの設計に影響を受ける。多くの先行研究は、インセンティブが与えられるメカニズムによって、消費者の異なる反応がもたらされることを明らかにしている (Gallagher and Muehlegger, 2011; Sarzynski *et al.*, 2012; Shrimali and Jenner, 2013)。消費者の反応は制度だけではなく環境などの幅広い情報にも影響される。しかしながら、太陽光発電市場において家計が得る情報の質と量には制約があるため、消費者は実際にどのようなインセンティブが利用可能なのかについての十分な情報を持たない (Rai and Beck, 2015)。

近年、補助金政策が住宅の太陽光発電システムの導入に与える影響に関する研究が増えている。Hughes and Podolefsky (2015) は、消費者の太陽光発電システムの需要に関して、カリフォルニア州での発電量ベースの補助金の効果を分析した。そして、補助金が太陽光発電の投資に大きな影響を与え、\$5,600 から \$6,070 への補助金の増額により、投資を 13% 増大させることを明らかにした。また、彼らはカリフォルニア州での太陽光発電の補助金を分析し、導入に対しては、導入時の補助金が大きな効果を発揮すること、また補助金がなければ、導入が 53% も減少することを明らかにした。Crago and Chernyakhovskiy (2017) は、リポートのプログラムや太陽光発電システムの発電の推計から、リポートによる追加的な太陽光発電の導入のインセンティブは kWh 当たり \$0.10 ~ \$0.19 であることを推計した。Burr (2016) は California

Solar Initiative (CSI) に関して消費者のインセンティブデザインに対する異なる反応を分析し、CSI 補助金がなければ導入は 85 パーセントも減少することを示した。

Gillingham and Tsvetanov (2018) は、住宅用の太陽光発電システムの需要を推定し、太陽光発電の需要の価格弾力性が -0.65 であることを明らかにした。さらに、Counterfactual なシミュレーション分析から、金銭的なインセンティブを半減すると、新規の導入が 9% も減少することを明らかにした。また Rogers and Sexton (2014) はリポートの弾力性を約 -0.4 と推定している。

Crago and Chernyakhovskiy (2017) は、金銭的なインセンティブの中で、リポートの効果だけが大きな優位性を持つことを明らかにした。1 ワットにつき 1 ドルのリポートの増大は、年間の太陽光発電の発電設備容量を 47% 増大させることも明らかにした。また、リースなどを認めることも、太陽光発電の発電設備容量の増大に強く影響する。さらには、太陽光発電の金銭的なリターンに影響を与える日射量などの変数や、環境保護の意識のレベルなどの変数も有意であることを明らかにした。

太陽光発電以外の研究に、州のインセンティブがハイブリッド車の導入に与えた影響を分析した Gallagher and Muehlegger (2011) がある。彼らは、税制インセンティブのタイプが消費者行動に異なる影響を与えることを明らかにした。そして、ハイブリッド車へのインセンティブについて、売上税に関するインセンティブが税額控除に関するものを大きく上回る効果を持つことを示した。Hitaj (2013) は、アメリカでの風力発電における州や政府のインセンティブが与えた影響を分析し、税制や生産へのインセンティブとともに、電力系統へのアクセスが風力発電の開発の促進に影響することを明らかにした。

金銭的なインセンティブに関する研究には、カリフォルニア州を事例とし、住宅での導入におけるリポートに焦点を当てているものがある。Mormann (2014) は、太陽光発電は多額の費用を要するため、税額控除はファイナンスとしては不

十分であり、導入時の費用に直結する政策が効果的であったとした。Shrimali and Jenner (2013) は、16 州での 27 のプログラムをもとに、太陽光発電の導入政策のインパクトを計測した。彼らは、税によるインセンティブより、キャッシュによるインセンティブの方が効果的であることを明らかにした。Sarzynski *et al.* (2012) は、1997 年から 2009 年にかけての現金や税制のインセンティブが太陽光発電の発電設備容量の成長に与えた影響を分析し、税制のインセンティブと異なり、現金のインセンティブは州レベルでの太陽光発電の発電設備容量の増大に対して有意な影響を与えたことを明らかにした。Kwan (2012) は、2000 年のアメリカのデータを用いて住宅用の太陽光発電の普及に環境的、政治的、社会的、経済的な変数が与えた影響を分析し、太陽光発電の導入を牽引した要因が日射量や電力価格、金銭的インセンティブであることを示した。

Matisoff and Johnson (2017) は、州政府の太陽光発電の投資に対する様々なメカニズムのインセンティブを取り上げ、キャッシュリバートだけが効果的であり、それもネットメータリングやファイナンスの利用可能性が導入された州でのみ効果的であることを明らかにした。キャッシュリバートの効果は、家計がファイナンスのメカニズムにアクセスできるほど効果が増すのである。

Burr (2016) は、屋根に設置する太陽光発電システムに対する需要をモデル化し、補助金プログラムの社会厚生上の効果を分析した。そしてカリフォルニア州での住宅用太陽光発電システムの導入について、発電設備容量に応じた補助金と発電量に応じた補助金の効果を比較した。その結果、補助金 1 ドル当たりの効果では、発電設備容量ベースの補助金の方が太陽光発電システムの投資を促すことを明らかにした。社会厚生観点では、発電量ベースの補助金の方が、効率的な場所での太陽光発電の導入を促すことがわかった。なぜなら、発電量ベースの補助金は日射量の多い場所での太陽光発電の導入を促進させるからである。結論として、導入時の発電設備容量に応じた補助金よりも、発電量に応じた補助金の方が太陽光発電シス

テムの導入に大きな効果を与えたことを明らかにしている。

5. FIT

FIT とは電力系統に再生可能エネルギーを販売する際の電力の kWh 当りの価格を指す。その決められた価格は卸と小売りの電力価格を上回るよう保証されている。つまり、FIT とはある期間において発電者が電力系統に売電する優遇的な価格のことである。この卸の電力価格よりも高い価格設定は、比較的に高い発電のコストや投資に対するリターンのために必要とされている。この FIT は再生可能エネルギーの急速な普及に最も効果的な政策であると考えられている (Mendonça, 2007)。その政策は他のものと比べ、再生可能エネルギーをより効率的で安価に供給することができる (Menanteau *et al.*, 2003)。FIT は再生可能エネルギーへの投資における不確実性を減少させて市場での成功を急速なものにするので、再生可能エネルギーの普及には最も効果的な政策である (Couture and Gagnon, 2010)。

太陽光発電システムの導入に対する優遇策は 2 つに大別できる。1 つ目は、設置する際に受け取るものであり、2 つ目は、発電する際に受け取るものである。FIT は後者の優遇策であり、買取価格は時間とともに低下し、それは新しい発電設備の設置に影響する。FIT の制度設計においては、契約期間が長いので、報酬に影響を与える変数の動的な性質の理解が重要である。また FIT の費用をカバーする手法も重要である。再生可能エネルギーの導入が大きくなると、FIT をサポートするための多大な費用が必要となり、それは消費者や納税者の負担となるからである。また、保証された価格は競争を阻害し、さらには低コストの再生可能エネルギーの普及を妨げることになる (Lipp, 2007)。

FIT の核心は再生可能エネルギーが生み出した電力をある固定期間で保証された価格で買い取ることである。これらの価格は生み出された全ての電力に対して差別することなく適用できるととも

に、技術の種類や導入の規模、再生可能エネルギーの源の品質などに応じて変化させることができる (Fouquet and Johansson, 2008)。このことにより、戸建て所有者や地主、農場、自治体などの多くの投資家を参加させるとともに、多くの異なる技術の再生可能エネルギーの開発を促進させることになる。Dijkgraaf *et al.* (2018) は、OECD30 カ国の1990年から2011年にかけてのパネルデータを用い、FITの買取価格の大きさだけでなく、買い取り契約期間の長さも一件当たりの太陽光発電システムの発電設備容量を増大させる効果が高いことを明らかにした。

このようにFITは再生可能エネルギーに投資するリスクを大きく低下させ、市場を急速に成長させる環境を創造することができる (Lipp, 2007)。この構造は将来のキャッシュフローを安定させ、投資家に対して再生可能エネルギーの開発での実際の費用に応じた報酬を与えることができる。プロジェクトの全期間で費用の回収を十分に行えるだけのFITの支払いを確保するとともに十分な利益を認めることが、FIT政策の成功の鍵を握る。

しかしながら、FITには賦課金の増大にともなう国民負担の増大という問題があり、日本やドイツでは電力買取価格が引き下げられている状況にある。電力の売買から得られる利益の減少は、利益を目的とした導入のインセンティブを低下させることになる。しかしながら、システム導入の費用も低下していることを踏まえると、今後は蓄電池を活用した自家消費を促す制度設計が必要となると考えられる。

6. ピア効果

太陽光発電の導入においてピア効果が大きいことが明らかにされている (Janssen and Jager, 2002)。Rai and Robinson (2013) は、ピア効果は意思決定の期間を短くすることを示している。つまり、ピア効果は潜在的な導入者に対して貴重な情報を伝達して太陽光発電システムの導入に関わる不確実性を低下させると解釈できるのである。Bollonger and Gillingham (2012) は、太陽光発電

システムの導入でのピア効果におけるCSIリポートの役割を分析し、高い普及率と高いCSIリポートの関係を示した。

Rode and Weber (2016) では、空間的なピア効果を詳細なレベルで推計し、太陽光発電の導入のピア効果は局所的であり、家庭での太陽光発電システムの導入に重要な要因であることを明らかにした。さらには、局所的なピア効果は距離が離れるほど低下し、1km離れると、ほとんど影響がなくなることを明らかにした。

太陽光発電システム市場が成熟すると、地域的な暗黙知は時間とともに成文化される。そして、地域的なノウハウが技術的に具体化され製品化に至ると、システムの普及が加速することになる (Shum and Watanabe, 2009)。しかしながら、システムの設置に関する知識の共有化のためには、技術とコミュニティや地域の歴史的な背景との結びつきが必要である。そのため、太陽光発電システムの効果的な普及には、太陽光発電システムの開発企業と設置業者との関係の強化が必要である (Verhees *et al.*, 2013)。

Hughes and Podolefsky (2015) は、カリフォルニア州でのCSIが太陽光発電の導入に与えた影響について、カリフォルニア州の電力会社の違いを利用し、境界線から20マイルの地域に限定して分析し、\$0.1/wattのリポートが一日当たり7~15%の導入の増大をもたらしことを明らかにした。同様に、Hughes and Podolefsky (2013) や van Benthem *et al.* (2008) は、現状のカリフォルニアの政策は効率的であることを示している。一方、Rogers and Sexton (2014) は、太陽光発電システムの需要はリポートに対して反応的ではなく、温室効果ガスの排出を避けるためのコストは一般に考えられている社会的コストを300%も上回ることを明らかにした。さらに、最適な場所での設置と比べ、現状のシステムは効率性が少なくとも15%失われていることを明らかにした。この結論は、最適な場所での発電を行うことで、同じ発電量を低いコストで実施できることを示している。

許可のプロセスが容易な都市での太陽光発電シ

システムの導入費用は、許可を得るのが面倒な都市よりも費用が安い (Dong and Wiser, 2013)。太陽光発電の導入者が集中している場所での設置費用はとても低い (Gillingham *et al.*, 2016)。加えて、導入の規模や経験も費用を低下させることも明らかとなっている。

太陽光発電システムの普及には、国や地域レベルでのシステムに対する認識の共有も重要である (Smith *et al.*, 2014)。太陽光発電技術に対する事業の有望性や雇用機会の存在、エネルギー供給の確実性などの社会における認識が向上すると、太陽光発電システムの普及が促進される (Verhees *et al.*, 2013)。そのため、太陽光発電システムの普及促進を図る機関や業界団体による消費者やコミュニティの技術の認知と理解を向上する活動が重要となっている (Dewald and Truffer, 2012)。

7. 結論

太陽光発電システムの価格下落やリース事業の進展、そして政府による補助金などの政策により、世界的に太陽光発電の普及がめざましい。しかし、急速な普及は電力系統への接続に対する悪影響や補助金や FIT などに伴う国民負担の増大などにより、効率的な普及に向けた新たな政策の展開が求められている。本稿では、太陽光発電システムの需要構造を分析した先行研究を概観することで、効率的な普及を実現するための要因を把握し、普及政策の効果について検討した。

その結果、以下のことが明らかとなった。太陽光発電の出力変動は大きく、そのような太陽光発電を効果的に活用するには、通常の発電所の柔軟な運用とともに、バックアップ電源の設置が必要である。太陽光発電システムへの投資には大きな不確実性を伴うため、FIT などの固定的な金銭的インセンティブとともに、リースなどの不確実性を低下させる取引形態の普及促進が効果的である。補助金の効果については、発電量ベースの補助金は日射量の多い場所での太陽光発電の導入を促進させるため、導入時の発電設備容量に応じた補助金よりも、太陽光発電システムの導入と効率

性を高める。発電量ベースの補助金である FIT は、再生可能エネルギーに投資するリスクを大きく低下させ、市場を急速に成長させる環境を創造することができる。太陽光発電システムの導入にはピア効果が存在し、普及においてコミュニティの役割が重要である。また、効率的な場所での発電を行うことで、同じ発電量を低いコストで実施できる。

近年、太陽光発電による電力を効率化する取り組みとして、分散型エネルギー資源 (Distributed Energy Resources, DER) が注目されている。これは、電力系統に接続される分散電源や蓄電システム、デマンドレスポンス技術などを含む総称である。DER の活用により、電力会社の設備投資コストの低下と、需要家の電気料金削減につながる事が期待されている (Rahman *et al.*, 2015)。DER を効率的に運用するためには、最適な設置地域の特定制や DER の調達方法などの検討が必要となる。本稿の分析で明らかにした太陽光発電の需要構造の特徴を活用すれば、最適な DER を実現するよう太陽光発電システムの導入をコントロールすることができる可能性が高い。そのような目的の下、太陽光発電のミクロ的な需要構造を実証的に分析することが今後の課題である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 (研究課題番号 18K01579) の助成を受けている。

参考文献

- Badcock J., and M. Lenzen (2010) Subsidies for electricity-generating technologies: a review. *Energy Policy*, 38, 5038-5047.
- Bauner, C., and C. L. Crago (2015) Adoption of residential solar power under uncertainty: implications for renewable energy incentives. *Energy Policy*, 86, 27-35.
- Barbose, G., N. Darghouth, S. Weaver, and R. Wiser

- (2013) *Tracking the Sun VI: an Historical Summary of the Installed Price of Photovoltaics in the United States from 1998 to 2012*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
- Bentham, A. V., K. Gillingham, and J. Sweeney (2008) Learning-by-doing and the optimal solar policy in California. *The Energy Journal*, 29, 131-152.
- Blackburn, G., C. Magee, and V. Rai (2014) Solar valuation and the modern utility's expansion into distributed generation, *Electricity Journal*, 27, 18-32.
- Bollinger, B., and Gillingham, K. (2012) Peer effects in the diffusion of solar photovoltaic panels, *Marketing Science*, 31, 900-912.
- Burr, C. (2016) Subsidies and investments in the solar power market. *Working paper*.
- Butler, L., and K. Neuhoff (2008) Comparison of feed in tariff, quota and auction mechanisms to support wind power development. *Renewable Energy*, 33, 1854-1867.
- Chang T. P. (2009) The gain of single-axis tracked panel according to extraterrestrial radiation. *Applied Energy*, 86, 1074-1079.
- Couture, T., and Y. Gagnon (2010) An analysis of feed-in tariff remuneration models: implications for renewable energy investment. *Energy Policy*, 38, 955-965.
- Crago, C. L., and I. Chernyakhovskiy (2017) Are policy incentives for solar power effective? Evidence from residential installations in the Northeast. *Journal of Environmental Economics and Management*, 81, 132-151.
- Darghouth, D. R., G. Barbose, and R. Wiser (2011) The impact of rate design and net metering on the bill savings from distributed PV for residential customers in California. *Energy Policy*, 39, 5243-5253.
- Davidson, C., D. Steinberg, and R. Margolis (2015) Exploring the market for third-party-owned residential photovoltaic systems: insights from lease and power-purchase agreement contract structures and costs in California. *Environmental Research Letters*, 10.
- Davies, S. W., and I. Diaz-Rainey (2011) The patterns of induced diffusion: Evidence from the international diffusion of wind energy. *Technological Forecasting and Social Change*, 78, 1227-1241.
- Dewald, U., and B. Truffer (2012) The local sources of market formation: explaining regional growth differentials in German photovoltaic markets. *European Planning Studies*, 20, 397-420.
- Dijkgraaf, E., T. P. van Dorp, and E. Maasland (2018) On the effectiveness of feed-in tariffs in the development of solar photovoltaics. *The Energy Journal*, 39, 81-99.
- Dong, C., and R. Wiser (2013) The impact of city-level permitting processes on residential photovoltaic installation prices and development times: an empirical analysis of solar systems in California cities. *Energy Policy*, 63, 531-542.
- Drury, E. M. Miller, C. M. Macal, D. J. Graziano, D. Heimiller, J. Ozik, and T. D. Perry IV (2012) The transformation of southern California's residential photovoltaics market through third-party ownership. *Energy Policy*, 42, 681-690.
- Eke, R., and A. Senturk (2012) Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. *Solar Energy*, 86, 2665-2672.
- Fischlein, M., and T. M. Smith (2013) Revisiting renewable portfolio standard effectiveness: policy design and outcome specification matter. *Policy Sciences*, 46, 277-310.
- Fouquet, D., T. B. Johansson (2008) European renewable energy policy at crossroads: focus on electricity support mechanisms. *Energy Policy*, 36, 4079-4092.
- Gallagher, K. S., and Muehlegger, E. (2011) Giving

- green to get green? Incentives and consumer adoption of hybrid vehicle technology. *Journal of Environmental Economics and Management*, 61, 1-15.
- Gillingham, K. and T. Tsvetanov (2018) Hurdles and steps: estimating demand for solar photovoltaics. *Quantitative Economics*, forthcoming.
- Gillingham, K., H. Deng, R. Wiser, N. Darghouth, G. Nemet, G. Barbose, V. Rai, and C. Dong (2016) Deconstructing Solar Photovoltaic Pricing: The role of market structure, technology and policy, *The Energy Journal*, 37, 231-250.
- Graziano, M., and K. Gillingham (2015) Spatial patterns of solar photovoltaic system adoption: the influence of neighbors and the built environment. *Journal of Economic Geography*, 15, 815-839.
- Hitaj, C. (2013) Wind power development in the United States. *Journal of Environmental Economics and Management*, 65, 394-410.
- Hughes, J., and M. Podolefsky (2015) Getting green with solar subsidies: evidence from the California solar initiative. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2, 235-275.
- Huld T. R. Gottschalg, H. G. Beyer, and M. Topić (2010) Mapping the performance of PV modules, effects of module type and data averaging. *Solar Energy*, 84, 324-338.
- Jaffe, A. B, R. G. Newell, and R. N. Stavins (2002) Environmental policy and technological change. *Environmental and Resource Economics*, 22, 41-70.
- Jager, W. (2006) Stimulating the diffusion of photovoltaic systems: A behavioural perspective, *Energy Policy*, 34, 1935-1943.
- Jäger-Waldau A. (2006) European photovoltaics in world wide comparison, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352, 1922-7.
- Janssen, M. A., W. Jager (2002) Stimulating diffusion of green products. *Journal of Evolutionary Economics*, 12, 283-306.
- Kwan, C. L. (2012) Influence of local environmental, social, economic and political variables on the spatial distribution of residential solar PV arrays across the United States, *Energy Policy*, 47, 332-344.
- Lipp, J. (2007) Lessons for effective renewable electricity policy from Denmark, Germany and the United Kingdom. *Energy Policy*, 35, 5481-5495.
- Matisoff, D. C., and E. P. Johnson (2017) The comparative effectiveness of residential solar incentives. *Energy Policy*, 108, 44-54.
- Menanteau, P., D. Finon, M.-L. Lamy (2003) Prices versus quantities: choosing policies for promoting the development of renewable energy. *Energy Policy*, 31, 799-812.
- Mendonça, M. (2007) *Feed-in Tariffs: Accelerating the Deployment of Renewable Energy*. Routledge, London.
- Mormann, F. (2014) Beyond tax credits-smarter tax policy for a cleaner, more democratic energy future. *Yale Journal on Regulation*, 31, 303-360.
- Parida, B., S. Iniyan S, and R. Goic (2011) A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1625-36.
- Ragwitz, M., C. Huber, and G. Resch (2007) Promotion of renewable energy sources: effects on innovation. *International Journal of Public Policy*, 2, 32-56.
- Rahman, H. A., Md. S. Majid, A. R. Jordehi, C. K. Gan, M. Y. Hassan, and S. O. Fadhl (2015) Operation and control strategies of integrated distributed energy resources: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1412-1420.
- Rai, V., and A. L. Beck (2015) Public perceptions and information gaps in solar energy in Texas. *Environmental Research Letters*, 10.
- Rai, V., and S.A. Robinson (2013) Effective information channels for reducing costs of

- environmentally-friendly technologies: evidence from residential PV markets, *Environmental Research Letters*, 8.
- Rai, V., and B. Sigrin (2013) Diffusion of environmentally-friendly energy technologies: buy versus lease differences in residential PV markets. *Environmental Research Letters*, 8.
- Razykov, T. M., and C. S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H. S. Ullal, H. M. Upadhyaya (2011) Photovoltaic electricity: current status and future prospects. *Solar Energy*, 85, 1580-608.
- REN21 (2016). *Renewables 2016. Global Status Report. Paris*
- Rode, J., and A. Weber (2016) Does localized imitation drive technology adoption? A case study on rooftop photovoltaic systems in Germany. *Journal of Environmental Economics and Management*, 78, 38-48.
- Rogers, E., S. Sexton (2014) Effectiveness of subsidies for residential rooftop solar adoption: lessons from California. *North Carolina State University Working Paper*.
- Rosendahl, K. E. (2004) Cost-effective environmental policy: implications of induced technological change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 48, 1099-1121.
- Sarzynski, A., J. Larrieu, and G. Shrimali (2012) The impact of state financial incentives on market deployment of solar technology. *Energy Policy*, 46, 550-557.
- Shih, L. H., and T. Y. Chou (2011) Customer concerns about uncertainty and willingness to pay in leasing solar power systems. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 8, 523-532.
- Shum, K. L., C. Watanabe (2009) An innovation management approach for renewable energy deployment—the case of solar photovoltaic (PV) technology. *Energy Policy*, 37, 3535-3544.
- Shrimali, G., and S. Jenner, (2013) The impact of state policy on deployment and cost of solar photovoltaic technology in the U.S.: a sector-specific empirical analysis. *Renewable Energy*, 60, 679-690.
- Smith, A., F. Kern, R. Raven, and B. Verhees (2014) Spaces for sustainable innovation: solar photovoltaic electricity in the UK. *Technological Forecasting and Social Change*, 81, 115-130.
- Verhees, B., R. Raven, F. Veraart, A. Smith, and F. Kern (2013) The development of solar PV in The Netherlands: a case of survival in unfriendly contexts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 275-289.
- Wang, D. D., and T. Sueyoshi (2017) Assessment of large commercial rooftop photovoltaic system installations: Evidence from California, *Applied Energy*, 188, 45-55.
- Wiser, R., D. Millstein, T. Mai, J. Macknick, A. Carpenter, S. Cohen, W. Cole, B. Frew and G. Heath (2016) The environmental and public health benefits of achieving high penetrations of solar energy in the United States. *Energy*, 113, 472-486.

Demand structure and the impact of policy on deployment of solar photovoltaic systems

KIYOSHI ARAKAWA

Department of Social Information Studies, Otsuma Women's University

Abstract

In recent years, solar photovoltaic systems have spread rapidly worldwide due, in part, to government subsidy policies. Because investments in solar photovoltaic systems involve significant uncertainty, along with financial incentives for fixed amounts, such as feed-in tariffs, leasing has gained popularity. To promote solar photovoltaic systems efficiently, governments grant subsidies in which the amount depends on the capacity of power generation at the time of installation or subsidies in which the amount depends on the quantity of power generation. Due to peer effects, community plays an important role in spreading installation of solar photovoltaic systems. This paper reviews the current literature on the demand structures and the impact of policy on the deployment of solar photovoltaic systems to grasp important factors for promoting the systems and to consider the effectiveness of policies in promoting the systems.

Key Words (キーワード)

Solar photovoltaic (太陽光発電), demand structure (需要構造), subsidy (補助金), uncertainty (不確実性), renewable energy (再生可能エネルギー)

